



TITLE:

指先の把持力と速度に着目したつまみ及びつかみ操作の識別

AUTHOR(S):

山下, 達也; 中尾, 恵; 松田, 哲也

CITATION:

山下, 達也 ...[et al]. 指先の把持力と速度に着目したつまみ及びつかみ操作の識別. 電子情報通信学会技術報告 (MBE) 2020, 119(452): 91-96

ISSUE DATE:

2020-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/250422>

RIGHT:

copyright©2020 IEICE; 許諾条件に基づいて掲載しています。

指先の把持力と速度に着目したつまみ及びつかみ操作の識別

山下 達也[†] 中尾 恵[†] 松田 哲也[†]

[†] 京都大学大学院 情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: [†] {tyamashita, megumi, tetsu}@i.kyoto-ac.jp

あらまし 日常生活において指先操作は重要な役割を果たしており、様々な分野で指先操作解析の重要性が高まっている。指先操作の理解を目的とした様々な研究がなされているが、操作の対象とする物体が限定された実験や、センサによって指先感覚が阻害された状況で行われた研究が多い。本研究では、つまみ及びつかみ操作を対象として、2 操作の違いの理解を目指している。指先感覚を阻害せずに指先ひずみと指先三次元位置の同時計測が可能な実験システムを構築し、つまみ及びつかみ操作に着目して異なる重さの物体に対する 2 操作を計測し、定量的に分析を行ったので報告する。

キーワード 特徴量解析, 指先操作, 触覚情報

Identification of pick and grasp manipulation based on fingertip grip force and velocity

Tatsuya YAMASHITA[†] Megumi NAKAO[†] and Tetsuya MATSUDA[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

E-mail: [†] {tyamashita, megumi, tetsu}@i.kyoto-ac.jp

Abstract Finger manipulation plays an important role in daily life, and the importance of its analysis is increasing in a variety of research fields. Although many previous studies have examined finger manipulation, experiments have either tested only a limited range of operated objects, or the sensation of the fingertip has been inhibited by attached sensors. The current study focused on hold and pick manipulations, exploring dynamic features of the thumb and index fingers. We used a haptic wearable sensor that could measure finger pressure without inhibiting the operator's sense of touch and position sensor. Focusing on the pick and grasp operations, two operations on objects of different weights were measured and analyzed quantitatively.

Keywords Feature analysis, Fingertip manipulation, Haptics

1. はじめに

人間の日常生活において指先操作は重要な役割を担っており、その機能は多彩である。指先操作の定量的な理解は、様々な分野への応用に繋がると期待される。例えば、手術手技の修得には指先操作の熟練は欠かせないものであり、Virtual Reality (VR) 技術を用いた体験型のシミュレータ[1]や、ロボットマニピュレータの設計[2]にも応用できると考えられる。しかし、指先操作は、その計測の難しさから、各操作の違いや働きなど、それらの本質的な理解は困難である。

これまでに指先操作の理解を目的として、分類を行った研究、計測と解析を行った研究が報告されている。Cutkosky[3]は、指先操作の分類を行っており、提案された分類木を用いることは指先操作の分類や比較の際に有効である。一方で、提案された分類木は操作する手の姿勢に基づく定性的な分類であるため、定量的な差異は明らかにされていない。また、計測と解析を行った従来研究として、指先の挙動を連続的に撮影する

ことで指先操作の解析を行った研究[4]や、関節の角度に着目した研究[5]が存在する。前者の場合、指先の形状や関節を観察することで指先の役割を分析することができるが、写真を用いた解析を行っているため、定量的な議論が難しい。また、後者の場合、関節に着目した解析であるため、指先運動の計測値に基づく議論が出来ない。一方で、指先に加わる力を計測し、計測値の特徴量を用いることで解析を試みた研究[6-7]も存在する。指先の接触力に関する一定時間の計測値をその平均値などの 1 次元の特徴量に変換することで指先への力の加わり方及び各指の働きを定量的に分析することができるが、一方で計測値が持つ時系列的な情報は失われる。指先操作の理解を目的とした研究[8-9]は多く行われているが、指先操作を計測して得られるデータを時系列的に解析した研究は少ない。近年、指先操作を計測して得られるデータを時系列的に解析した研究[9]も報告されているが、一指による操作の解析のみに留まっており、複数指の解析には至っていない。

このように、複数指操作を対象として、計測値を時系列的に解析した研究は知られておらず、各操作における指の動きや力の与え方に関する動的な特性と各指の役割、個人差、異なる物体に対する各指の使い分け等は明らかになっていない。

本研究では、複数指操作であるつまみ操作とつかみ操作を対象として、これらの操作を識別可能な指先に関する特徴量の探索することを目的とする。この2操作は、対象物を持ち上げる、引っ張る、押し込むなど類似した目的に用いられることがあるが、一般に異なる操作として知られている。しかし、力学的、あるいは定量的には、2操作にどのような差異があるのか、それぞれの役割は何かなど依然不明確な点が多い。我々は、過去につまみ操作及びつかみ操作を対象とした研究を行った[7]。母指と示指の2指に関して計測を行い、1操作につき時系列変化を無視して接触力及び加速度の計測値からそれぞれ一つの平均値及び分散値を算出し、4種類の統計量から算出される特徴量に基づいて82.8%の認識率で識別可能であると結論付けた。しかし、当該研究では一定時間の計測値から1次元の特徴量に変換して解析を行ったため、計測値が有する時系列的な情報が失われる解析となっていた。従来手法を用いることで2操作は識別可能であることが示されたが、一連の操作を1次元の特徴量として処理する方法が最適か否かは自明ではない。そこで、1操作につき1次元の特徴量を算出する解析手法を、1操作につきN次元の特徴量を算出する解析手法に拡張し、算出した指先操作における時系列かつ多次元の特徴量に基づいて2操作の識別を試みる。また、計測対象の指として中指を追加する。これは、把持操作において中指は物体を支える役割を果たす重要な指であると想定しているためである。母指、示指、中指の接触力及び速度に関する6チャンネルの計測データをN区間に分割し、それぞれの区間で特徴量を算出することで $6 \times N$ 次元の特徴ベクトルとする。本論文ではこれを指先操作における時系列かつ多次元の特徴量と定義する。複数の物体に対する指先操作を計測する被験者実験を実施し、つまみ操作とつかみ操作識別に有効な分割数Nの選定を試みた。定めた分割数Nに基づいて識別に有効な特徴量の選定を行い、異なる重さの物体に対する2操作を定量的に分析した。

2. 計測と解析

2.1. 問題設定

本研究では、つまみ操作とつかみ操作を対象として、2操作を識別可能な指先に関する動的特徴量を探索する。本論文では、我々の研究[7]と同様に、つまみ操作を、物体を保持する際に手掌部を物体と密着させない

操作、つかみ操作を、物体を保持する際に手掌部を物体と密着させる操作と定義する。また、物体を操作する速度が、2操作で異なることを想定しているため、指先に加わる力とともに、速度にも着目する。なお、力については物体に対する押し込みを対象とし、指腹に対して垂直な方向の力の大きさに着目する。速度についても物体を操作する手の向きや座標系に依存しない特徴量とするため、速度の大きさに着目する。

1章で述べたように、時系列的な情報を有したデータを1点に変換することは、必ずしも最適な方法とは限らない。そこで、1操作につき1次元の特徴量を算出する解析手法を、1操作につきN次元の特徴量を算出する解析手法に拡張し、2操作の識別に有効な分割数Nを探索する。本研究では、計測点は母指、示指、中指それぞれの接触力と速度という6チャンネルの計測データで構成されている。分割数Nの値を変化させることで、様々な $6 \times N$ 次元の特徴ベクトルを算出する。本論文では、これを指先操作における時系列かつ多次元の特徴量と定義する。

2.2. 実験デザイン

操作対象物体

本研究では、被験者がつまみ、つかみ操作を実施する対象物体として、重さのみが異なる7種類の物体を作成した。作成にあたり重さ以外の変化による操作への影響を避けるため、次の3点に留意した。まず、視覚的影響を考慮し、把持物体の大きさを統一した。次に、物体の重心位置を固定した。最後に、手の姿勢による影響を考慮し、把持位置を統一した。以上3点の条件に留意し、直径80 mm、高さ50 mmの円筒形Poly-Lactic-Acid(PLA)樹脂物体を作成した(図1)。円筒形の物体を採用したのは、操作対象とする物体を手で馴染む形状とするためである。図1(b)に示す① - ③部分におもり(図1(d))を装填することで、重さのみが異なる7種類の物体を作成する。図1(c)に示す上げ底物体は、物体の重心を一定に保つために使用した。

実験装置

つまみ操作及びつかみ操作は、指先に力を加えて物体を保持する操作である。このとき、指先に加わる力は、指先と対象物間に遮蔽物が有るか否かによって変化する[10]ため、指先と対象物間に遮蔽物が存在せず、指腹の触感を阻害しない計測システムの構築が重要と考えられる。そこで、人間の自然な手指操作を計測するために、Nakaoら[10]の方法を採用する。まず、接触力計測のために、テック技販製のHaplogを採用した。次に、指先位置計測のために、Ascension Technology社製の3D Guidance MedSAFE sensorを採用した。図2にHaplog及び磁気センサを装着した状態で行ったつまみ操作とつかみ操作に関する計測の様子を示す。指

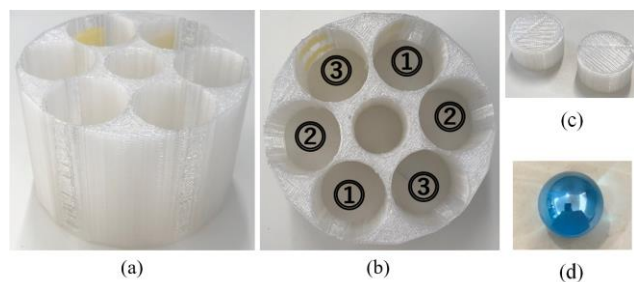


図 1. 操作物体 (a)側面把持部分, (b)おもり装填部分, (c)上げ底物体, (d)おもり

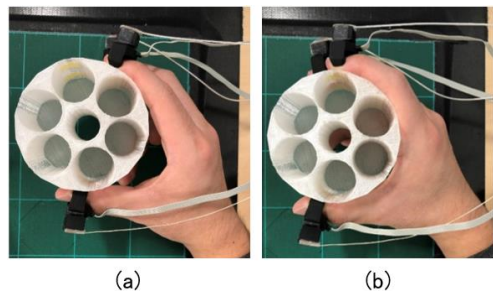


図 2. センサを装着した状態でのつまみ操作及びつかみ操作 (a)つまみ操作, (b)つかみ操作

腹を覆わない形のセンサによって指腹の触感を阻害しない計測が達成され、想定するつまみ操作及びつかみ操作の解析が可能である。各指の太さや硬さは操作者ごとに異なるため、事前のキャリブレーションによって得た指先ひずみと接触力間の関係に基づいてひずみ値から接触力へ変換する。本研究では Haplog 及び磁気センサを母指、示指、中指に装着し、母指の接触力 p_t 、母指の速度の大きさ v_t 、示指の接触力 p_i 、示指の速度の大きさ v_i 、中指の接触力 p_m 、中指の速度の大きさ v_m の六つの計測値を得る。

実験プロセス

本研究では、1 回の操作を以下のように設定し、ガイドボールに沿って操作を行う(図 3)。

- 3 本の指で物体を把持する (3 秒)
- 物体上面を図 3 中の点 P まで持ち上げる (5 秒)
- 物体上面を点 P の位置で維持する (5 秒)
- 物体を下ろす (5s)
- 物体を離す (3s)

2 操作の識別に有効な分割数 N を検討するために、1 回の操作内に含まれる計測点数は常に等しい必要がある。そこで、本研究では下林ら[6]の方法を採用し、音刺激を用いて操作のタイミングを指定する。各動作の開始時にピープ音が鳴り、ピープ音に従って操作を行う。1 物体に対してつまみ及びつかみ操作をそれぞれ 5 回ずつ繰り返し、105 秒間の計測データを取得する。

較正プロセス

本項では、ひずみ値の較正について述べる。Haplog は指腹の変形に基づいて歪み値を計測するが、指腹は

物体に触れていない状態であっても、指を曲げる、力を入れることによって変形する。また、歪み値は、各被験者の指先形状やセンサの装着状態によっても変化する。本研究では、接触力を利用した特徴量解析が目的であるため、歪み値を接触力に変換する較正プロセスを、操作する物体を変化させる度を実施する。実際の較正は、下林らの研究[6]で用いられた較正装置を用いて実施する(図 4)。定荷重バネによって合計 5.88N の力で引っ張られているかごを、1 本の指を用いて押し下げ、数秒間維持することで指先に荷重を与える。具体的な較正の流れを以下に示す。

- 指先が物体に非接触な状態で母指の歪み値を 5 秒間計測し、その間の歪み値の平均値 ϵ_0 を取得
- かごを押し下げる
- 押し下げた状態を 10 秒間維持する
- かごを押し下げている 10 秒間の中で、後半の 5 秒間に着目し、その間の歪み値の平均値 ϵ_1 を取得
- 以下の式で、計測値 ϵ_m を指先の接触力 p に変換

$$p = (\epsilon_m - \epsilon_0) / (\epsilon_1 - \epsilon_0) \times 5.88$$

- 示指、中指に関して a) - e) を実行

2.3. 指先の動的特徴量

計測データの分割

時系列で得られる計測値から、1 回の操作を抽出する。本研究では、1 回の操作を時間単位で分割した 5 ステップの動作で構成している。5 ステップの動作の中で、物体を持ち上げる区間 A、物体を同じ高さで維持する区間 B、物体を下ろす区間 C を被験者全員が同じ操作をしている区間と仮定し、各区間に着目した解析を行う。本研究では、A、B、C 各区間で行われる一連の操作を 1 回のつまみ操作或いはつかみ操作とみなす。A、B、C 各区間を N 区間に分割し、6 チャネルそれぞれに関して、 N 個の各区間に含まれる計測値の平均値を算出し、 $6 \times N$ 次元の特徴量を取得する。得られた特徴量に基づいて、2 操作の識別を試みる。ここで、2 操作の識別に有効な分割数 N は自明ではないため、被験者実験を通して決定する。

多次元特徴量の算出

各時刻の計測値のみからつまみ操作やつかみ操作を一意に識別することは容易ではないため、区間 A、B、C における ϵ_t 、 v_t 、 ϵ_i 、 v_i 、 ϵ_m 、 v_m の時系列データから特徴量を算出して解析を行う。なお、ステップが遷移する時刻のデータを除くため、各区間の前後 1 秒分のデータは除外する。

まず、歪み値 ϵ_t 、 ϵ_i 、 ϵ_m の計測値を較正し、接触力 p_t 、 p_i 、 p_m を算出する。次に、ノイズ軽減のために、6 チャネル全ての計測値を移動平均で平滑化する。本研究では、サンプリングレート 32Hz で計測しており、移動平均を取る際は隣接 3 点の平均値を利用する。

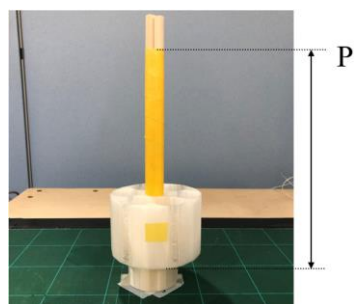


図 3. ガイドボール

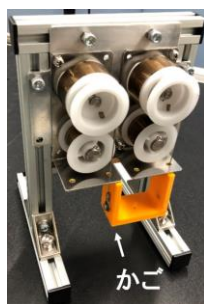


図 4. 較正装置

次に、A, B, C 各区間を N 区間に分割し、各 6 チャンネルに関して、各区間に含まれる計測値の平均値を算出することで、A, B, C 各区間における時系列かつ多次元の特徴量である $6 \times N$ 次元の特徴量とする。

3. 実験と考察

3.1. 実験システム

本研究では、被験者として、20 代健常男性 7 名 (右利き 6 名, 左利き 1 名), 20 代健常女性 2 名 (右利き 2 名) の合計 9 名を対象に計測を行うこととした。これ以降、 k 人目の被験者を被験者 k ($k = 1, 2, \dots, 9$) と表記する。各被験者は母指, 示指, 中指の 3 本の指を用いて用意された物体に対するつまみ操作及びつかみ操作を行う。その際の 3 指の測定値 $p_t, v_t, p_i, v_i, p_m, v_m$ から算出される特徴量に基づいて、つまみ操作とつかみ操作の識別を行い、提案特徴量の識別性能を評価することを本実験の目的とする。なお、本実験はヘルシンキ宣言に則り、京都大学 情報学研究科 人を対象とする研究倫理に基づいて、被験者のインフォームド・コンセントを得て実施された。被験者は円筒形 PLA 樹脂物体に対して、つまみ操作とつかみ操作を行う。物体を把持する箇所は側面とするよう、事前に実験者より指示し、以下の手順で計測実験を行った。

- [1] 被験者は右手母指, 示指, 中指にセンサを装着
- [2] 較正プロセスを実行し、 p_t, p_i, p_m を取得
- [3] 物体の重さを確認する
- [4] 実験プロセスを 5 回行う

同じ重さの物体に対して、[4] をつまみ操作、つかみ操作でそれぞれ実行し、物体の重さを変更した際に [2]-[3] を実施した。これ以降、物体の重さを M として、 $M = 45, 85, 125, 165, 205, 245, 285$ の 7 通りで実験を行った。

計測結果の例として、被験者 2 の 165g 物体に対するつまみ操作における、示指の接触力 p_i と示指の速度 v_i の時間変化を図 5 に示す。接触力は矩形波的に変化した。区間 A では p_i, v_i が変化する様子が確認できる。これは、指先に力を加えつつ物体を把持して持ち上げ、物体上面が点 P に到達した後に指先が静止している様子が表れている。区間 B では p_i, v_i が一定値で推移する様子が確認できる。これは、物体を一定の高さで維持し、指先が静止している様子が表れている。区間 C で

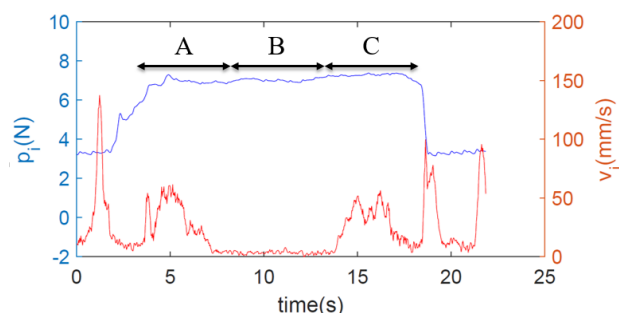


図 5. 1 回のつまみ操作時の p_i および v_i の時間変化例

は p_i が一定値で推移し、 v_i が変化する様子が確認できる。これは、指先に力が加わったまま物体を下ろし、下ろした後に指先が静止している様子が表れている。

各被験者の計測値に対して 2.3 節の処理を実行することで、特徴量解析に用いるデータを取得した。まず、2 操作の識別に有効な分割数 N の検討を行った。次に、2 操作の識別に有効なチャンネルセットの検討を行った。最後に、実験を通して得られた 2 操作の識別に有効な分割数 N および 2 操作の識別に有効なチャンネルセットを用いて、各重さの物体に関して識別を行った。

3.2. 2 操作の識別に有効な分割数 N の検討

本節では、物体の重さ M 及び分割数 N を変化させてつまみ操作とつかみ操作の識別を行い、識別率を算出することによって 2 操作の識別に有効な分割数 N を探索する。ここでは、常に 6 チャンネル全ての計測値を利用する。A, B, C 各区間で個別に、被験者単位の leave-one-out 交差検証を行う。つまみ及びつかみ 1 回の操作には、A, B, C 各区間が 1 個ずつ含まれており、1 個の区間につき 1 個の $6 \times N$ 次元の特徴量が抽出される。A, B, C 各区間で同様に、学習データには 2 操作それぞれから 8 人分のデータとして 40 回操作分のデータから抽出した 40 個の $6 \times N$ 次元の特徴量、合計 80 個の $6 \times N$ 次元の特徴量を使用した。テストデータには 2 操作それぞれから 1 人分のデータとして 5 回操作分のデータから抽出した $6 \times N$ 次元の特徴量、合計 10 個の $6 \times N$ 次元の特徴量を使用した。即ち学習データとテストデータに含まれる 2 操作のデータ割合は均等となる。Support-Vector-Machine (SVM) による識別を被験者の人数分である 9 回繰り返し、その平均を (重さ M , 分割数 N) における識別率とする。その際、MATLAB Statistics and Machine Learning Toolbox の fitcsvm を用い、カーネル関数はシグモイドカーネルとした。

まず、分割数 N を 1 から 96 まで 8 ずつ変化させて識別率を算出した。A, B, C 各区間に関して、各 (重さ M , 分割数 N) ($M = 45, 85, 125, 165, 205, 245, 285$) ($N = 1, 8, 16, 32, 48, 96$) に対する結果を図 6 に示す。全ての区間において、分割数 $N \leq 8$ で識別率が高い結果となった。この結果を受けて、96 を割り切ることができ、 $1 \leq N \leq 12$ を満たす分割数 $N = 2, 4, 6, 12$ を新たに追加

し、改めて解析を行った。A, B, C 各区間に関して、各(重さ M , 分割数 N) ($M = 45, 85, 125, 165, 205, 245, 285$)($N = 1, 2, 4, 6, 8, 12$)に対する結果を図 7 に示す。A, B, C 各区間で安定して識別率が高かった重さ $M = 45$ に着目すると、A, B, C 全区間で安定して識別率が高い分割数は、 $N = 6$ であった。この結果から、3.3 節以降では、各区間で安定して識別率が高い M が存在する分割数 $N = 6$ を用いて解析を行うこととした。

3.3.2 操作の識別に有効なチャンネルセットの検討

本節では、つまみ操作とつかみ操作の識別に有効な特徴量チャンネルを探索する。3.2 節の結果より、分割数 $N = 6$ を用いた場合に、各区間で高い識別率を示す重さ M が確認された。しかし、特徴量に全てのチャンネルを用いることが 2 操作の識別に最適か否かは自明ではない。そこで、6 チャンネルの計測値の中から識別に用いないチャンネルを設定し、全てのチャンネルセットに関して識別率を算出して検討を行う。

本節では、(重さ M , 分割数 N) = (45, 6)と固定し、チャンネルセットについて調査する。まず、識別に用いる接触力と速度のチャンネルを 6 から 1 つずつ減らし、 $2^6 - 1 = 63$ 通りのチャンネルセットを作成した。次に、A, B, C 各区間で SVM による識別を被験者の人数分である 9 回繰り返し、その平均を各チャンネルセットにおける識別率とした。最後に、A, B, C 全ての区間で識別率が向上するチャンネルセットに着目し、抽出されたチャンネルセットにおける識別率と、6 チャンネル全てを用いた場合の識別率との間で、1 因子 anova 検定を実施した。

区間 A, B, C における各チャンネルセットに対する識別率を図 8 に示す。A, B, C 各区間で、チャンネルを除外しない場合の識別率を赤線で示した。また、全ての区間において、除外するチャンネルセットが 2, 3 次元の場合に、チャンネルを除外しない場合と比較して同等以上の識別率を示したチャンネルセットが存在し、該当するチャンネルセットを赤帯で示した。抽出された各チャンネルセットを用いた場合の識別率と、6 チャンネル全てのチャンネルセットを用いた場合の識別率の間で、1 因子 anova 検定を実施した結果、全てにおいて有意差は見られなかった。そこで、3.4 節では 3 チャンネルの中で A, B, C 各区間の識別率が最も高かった(p_t , p_i , v_t)のチャンネルセットを用いて解析を実施した。

3.4. 物体の重さ毎の識別率

本節では、重さのみが異なる複数の物体を対象としたつまみ操作とつかみ操作の識別率を調査した。3.2 節で得られた分割数 N 及び、3.3 節で得られたチャンネルセットを用いて、各重さ M に対する識別率を調べた。

まず、3.2 節及び 3.3 節の結果を元に、 3×6 次元の特徴量を算出した。次に、A, B, C 各区間で SVM による被験者単位の leave-one-out 交差検証を実施した。以

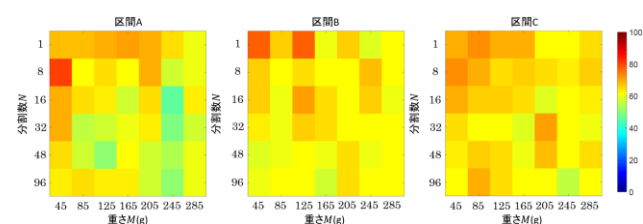


図 6. 各(重さ M , 分割数 N) における識別率($M = 45, 85, 125, 165, 205, 245, 285$) ($N = 1, 8, 16, 32, 48, 96$)

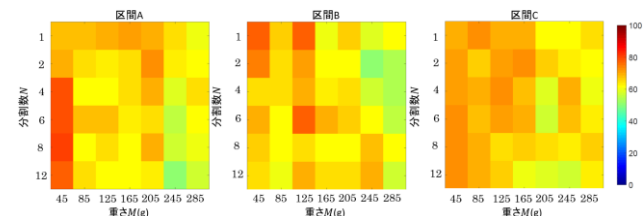


図 7. 各(重さ M , 分割数 N) における識別率($M = 45, 85, 125, 165, 205, 245, 285$) ($N = 1, 2, 4, 6, 8, 12$)

上の処理を各重さ M で繰り返し実行した。

交差検証によって得られた 9 名の被験者の識別率を図 9 に示す。識別率の中央値を折れ線グラフで結び、各 M における識別率の標準偏差をエラーバーで示した。また、A, B, C 各区間で、被験者ごとに全ての重さ M ($M = 45, 85, 125, 165, 205, 245, 285$)に対する識別率の平均値を算出した結果を表 1 に示す。

重さ $M = 45, 85, 205$ の物体で、A, B, C 全ての区間における識別率の中央値が 70%以上であった。一方、重さ $M = 245, 285$ では、A, B, C 全ての区間における識別率の中央値が 60%以下であった。また重さ $M = 125, 165$ の物体の識別率の中央値については、重さ $M = 245, 285$ の物体ほど低くはないが、 $M = 205$ の値以下となった。これらの結果から、重さ $M = 45, 85$ 程度の物体では、2 操作の使い分けを行いやすいが、重さ $M = 125, 165, 205$ 程度の物体では、2 操作を使い分けやすい重さそうでない重さが存在する可能性が示唆された。

次に、全ての重さを通して識別率のばらつきが大きくなった。そこで、A, B, C 全ての区間で、平均識別率が最も低かった被験者 6 に着目する。重さ $M = 45$ の計測データを確認したところ、被験者 6 ではつまみ操作時に比べて、つかみ操作時の p_t , p_i がより大きな値となる傾向が確認できた。一方で、 p_t , p_i いずれも他の被験者に比べて被験者 6 ではより小さい値であることも確認できた。それゆえ、異なる傾向の 2 操作を実行しても、他の被験者のデータに基づく決定境界が上手く機能しない場合が存在することが示唆された。

表 1: 全ての重さ M に対する平均識別率

被験者	1	2	3	4	5	6	7	8	9
区間 A	75.7	62.9	64.3	60.0	82.9	50.0	58.6	81.4	84.3
区間 B	82.9	61.4	64.3	60.0	82.9	50.0	58.6	77.1	84.3
区間 C	85.7	62.9	70.0	62.9	80.0	52.9	61.4	74.3	81.4

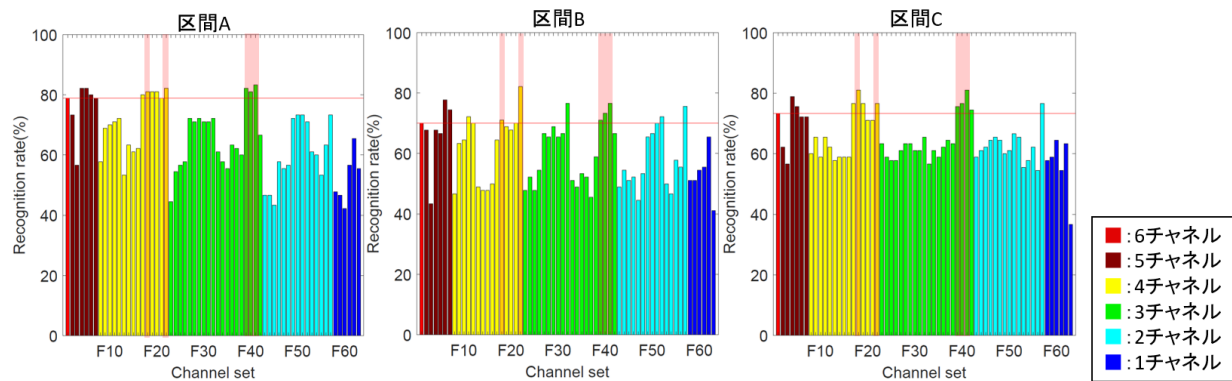


図 8. 各チャンネルセットにおける識別率

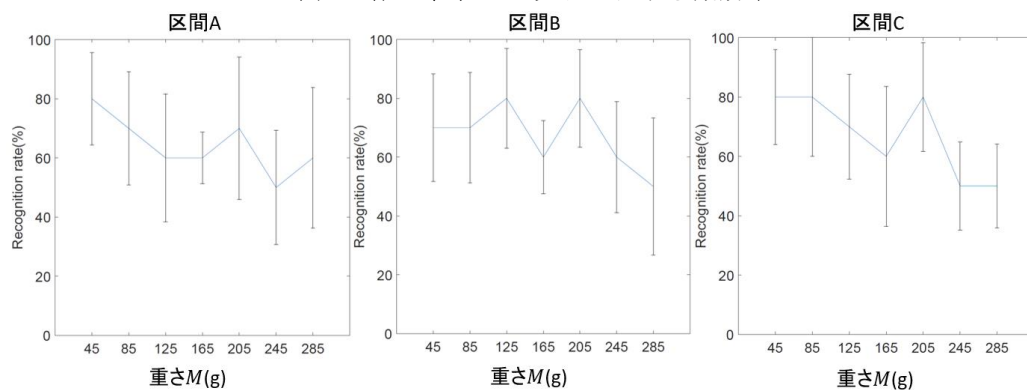


図 9. 物体の重さ M ごとの識別率

4. おわりに

本研究では、指先の把持力と速度に着目したつまみ及びつかみ操作の識別を目的とした．2 操作の特徴量算出においては、物体を持ち上げる区間、物体を同じ高さで維持する区間、物体を下ろす区間に着目した．

まず、2 操作の識別に有効な分割数 N を探索した結果、有効な分割数 N は 6 と選定され、時系列的な解析を行うことの有効性が示唆された．次に、つまみ操作およびつかみ操作の識別に有効な特徴量チャンネルを探索した結果、6 チャンネルを用いた場合と同等あるいはそれ以上の識別性能を有する 6 チャンネル未満のチャンネルセットが存在し、用いる特徴量チャンネルは 3 次元で十分であることが示唆された．各区間で安定して優れた識別性能を有したチャンネルセットとして、母指の接触力 p_t 、示指の接触力 p_i 、母指の速度の大きさ v_t が選定された．最後に、物体の重さに応じた識別率の変化を調べた結果、物体が重くなると識別率が低くなる傾向が示唆された．

今後の展望として、より高い識別率を示す時系列特徴量の探索や自動抽出法の確立、物体の重さに加えて形状にも着目した解析、つまみ及びつかみ操作に留まらない幅広い複数指操作に関する調査が期待される．

文 献

- [1] M. Nakao, K. Minato, T. Kuroda, M. Komori, H. Oyama, and T. Takahashi, Transferring Bioelasticity Knowledge through Haptic Interaction, IEEE MultiMedia, Vol. 13, No.3, pp. 50-60, 2006.
- [2] Z. Chen, C. Ott, and N. Lii, A Compliant Multi-finger Grasp Approach Control Strategy Based on the Virtual Spring Framework, ICIRA, Vol. 9245, pp. 381-395, 2015.
- [3] M. R. Cutkosky, On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No.3, pp. 269-279, 1989.
- [4] L. Vainio, M. Tucker, and R. Ellis, Precision and power grip priming by observed grasping, Brain and Cognition, Vol. 65, No.2, pp. 195-207, 2007.
- [5] T. Feix, T. L. Kivell, E. Pouydebat, and A. M. Dollar, Estimating thumb-index finger precision grip and manipulation potential in extant and fossil primates, INTERFACE, Vol. 12, No.106, 2015.
- [6] 下林秀輝, 中尾恵, 松田哲也, 物体把持時における複数指を対象とした接触力の関係解析, 電子情報通信学会技術報告(MBE), Vol. 118, pp. 37-42, 2019.
- [7] 山下達也, 中尾恵, 松田哲也, つまみ及びつかみ操作に関する指先の動的特徴量の分析, 生体医工学, Vol. 57, No.2-3, pp. 68-74, 2019.
- [8] F. E. V. Beek, W. M. B. Tiest, W. Mugge, and A. M. L. Kappers, Haptic perception of force magnitude and its relation to postural arm dynamics in 3D, Sci. Rep, Vol. 5, No.18, pp. 1-11, 2015.
- [9] M. Nakao, M. Senoo, and T. Matsuda, Fingertip-based Feature Analysis for the Push and Stroke Manipulation of Elastic Objects, IEEE Trans. on Haptics, Vol. 1, No.4, pp. 1-10, 2017.
- [10] G. Ganesh, R. Osu, and E. Naito, Feeling the force: Returning haptic signals influence effort inference during motor coordination, Sci. Rep., Vol. 3, No.2648, pp. 1-7, 2013.